

基于非线性预测控制算法的发电机励磁与快速汽门协调控制

肖智宏¹, 庄博², 韩柳¹

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京 100761; 2. 华北电网有限公司, 北京 100053)

摘要: 在非线形预测控制理论的基础上, 提出了基于多目标方程的综合预测模型。采用发电机功角和机端电压输出方程为预测模型对各状态变量进行预测, 在线滚动优化求出含有预测信息的励磁与快控汽门协调控制规律。通过建立预测模型方式, 较好地解决了发电机状态方程非线性、时变的问题; 通过对多目标系统综合求解, 实现发电机组励磁与快速汽门系统的相互关联、协调控制。对单机无穷大系统的计算机仿真结果表明, 采用此算法提高了系统的暂态稳定性和电压稳定性, 增强了系统在故障后的动态品质。

关键词: 电力系统稳定; 发电机协调控制; 非线性预测控制

Coordinated control of excitation and fast valve based on nonlinear prediction algorithm

XIAO Zhi-hong¹, ZHUANG Bo², HAN Liu¹

(1. State Power Economic Research Institute, Beijing 100761, China;

2. North China Grid Company Limited, Beijing 100053, China)

Abstract: On the basis of nonlinear predictive control strategy, a multi-objective system equation is proposed. The coordinated control design method of excitation and fast valve based on nonlinear predictive control is put forward and the controlling regulation is obtained. The predictive modeling and the idea of multi-objective system control theory can well resolve the problem of nonlinear, time-varying and interrelation of power system. The simulations of single machine infinite bus system show that by use of coordinated control of excitation and fast valve law based on nonlinear prediction control algorithm the power angle stability and voltage stability can be evidently improved and dynamic characteristics can be enhanced.

Key words: power system stability; generator coordinated control; nonlinear predictive control

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0055-04

0 引言

我国电网实施“一特四大”战略。在发展大煤电、大水电、大核电、大可再生能源基地建设, 加快建设特高压电网, 实现更大范围内资源优化配置的同时, 电力系统的暂态稳定性和电压稳定性日益突出。发电机励磁系统和快速汽门系统除了用于维持机端电压恒定, 保证发电机组间的有功和无功功率合理分配外, 还是提高电力系统稳定性的重要手段。对于易受各种扰动的电力系统而言, 能否设计出一种合适的发电机励磁与快速汽门控制器对提高电力系统稳定性非常重要。

为提高电力系统的稳定性, 人们对基于经典控制理论的PID励磁调节器、电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)和基于现代控制理论的励磁系统与快速汽门最优控制^[1]、非线性控制^[2-6]等进行了大量的实验研究, 但这些结论一般都是在不考虑电力系统中其他控制系统的情况下得到的。单目

标控制系统在单目标优化控制意义下能起到较好的效果, 但从多目标优化协调的角度, 往往由于提高了局部控制效果而导致系统中其他部分或者整体系统性能的恶化。在电网实际运行中, 当系统发生故障后往往需要多个控制器协调动作, 才能达到最好的控制效果。

预测控制是一种计算机算法, 它采用多步预测的方式增加了反映过程未来变化趋势的信息量, 因而能克服各种不确定性因素和复杂变化的影响。文献[7]提出了基于人工神经网络预测模型的智能预估控制; 文献[8]采用模型预测控制理论推导了多变量偏差值的非线性预测励磁控制规律。文献[9-10]提出了应用灰色预测控制算法的发电机励磁控制和调速控制。但上述控制策略往往不存在解析解, 在线计算量较大。

本文在非线形模型预测控制理论的基础上, 应用输出函数预测模型对发电机的功角、电压进行建模, 综合功角和电压两种性能指标后, 在线滚动优

化求出以预测值为状态变量的发电机励磁和快速汽门控制系统的最优反馈增益,从而得出具有预测信息的励磁和快速汽门协调控制量。最后,运用此控制策略对单机无穷大系统进行了仿真。仿真结果表明,采用非线性预测控制理论的励磁和快速汽门协调控制显著地提高了电力系统暂态稳定性和电压稳定性。

1 非线性模型预测控制

近年来,预测控制取得了长足的进展。预测控制采用预测模型,扩大了反映过程未来变化趋势的信息量;在线滚动优化,较好地克服各种不确定性和复杂变化的影响^[11]。当非线性连续模型预测理论用于对系统发展变化的控制时,实现的是对未来态势的超前控制。随着采样的不断进行,非线性连续预测模型不断更新,其控制量适应对象的不断变化,对非线性系统具有较强的适应性,其突出优点是控制器存在解析形式,在线计算量小。

1.1 预测模型

连续模型预测控制对象一般为仿射非线性系统,可用输出函数作为预测模型^[12],也可用状态空间方程作为预测模型^[13]。其原理是将系统输出函数或状态方程进行 Taylor 级数展开后截尾处理,所得到的截尾模型作为预测模型。

控制系统状态变量 X 的第 i 个元素 $x_i (i=1,2,\dots,n)$ 对时间求导数,将第一次在导数中出现控制量 u 或其分量的导数的阶数 r_i 记作 x_i 的预测阶。

给定预测步长 h ,将 $x_i(t+h)$ 进行 Taylor 级数展

$$x_i(t+h) = x_i(t) + hx_i'(t) + \frac{h^2}{2!}x_i''(t) + \dots + \frac{h^{r_i}}{r_i!}x_i^{(r_i)}(t) + \dots \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

取前 r_i+1 项,则 $X(t+h)$ 可以近似表示为

$$X(t+h) = X(t) + Z(X(t),h) + \Lambda(h)N(X(t))U(t) \quad (2)$$

其中,

$$(a) \quad Z_i = hL_f^0(f_i) + \frac{h^2}{2!}L_f^1(f_i) + \dots + \frac{h^{r_i}}{r_i!}L_f^{r_i-1}(f_i) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$L_f^k(f_i)$ 是 f_i 相对于 f 的 k 阶李导数;

$$(b) \quad N_i(X) = [L_{g_{1i}}L_f^{r_i-1}(x_i), L_{g_{2i}}L_f^{r_i-1}(f_i), \dots, L_{g_{mi}}L_f^{r_i-1}(f_i)] \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

$$L_{g_k}L_f^{r_i-1}(x_i) = \frac{\partial(L_f^{r_i-1}(x_i))}{\partial x} g_k \quad (5)$$

$$(c) \quad \Lambda(h) = \text{diag} \left[\frac{h^{r_1}}{r_1!}, \frac{h^{r_2}}{r_2!}, \dots, \frac{h^{r_n}}{r_n!} \right] \quad (6)$$

式(2)本质上是通过取控制作用 $U(\tau) \approx U(t), \tau \in [t, t+h]$,并对 $X(t+h)$ 的泰勒级数展开进行适当的截尾来获得 $X(t+h)$ 的预测模型。

1.2 滚动优化

预测控制需要已知系统状态量或输出量的期望轨迹,通过对状态量或输出量未来态势的超前控制,保证系统响应(或状态变量)逼近 Y^d ,即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|E(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|Y(t) - Y^d(t)\| = 0$ 。

如果状态期望轨迹用 $X^d(t)$ 表示,所取控制性能指标可表示为

$$J(u(t)) = \frac{1}{2} [X(t+h) - X^d(t+h)]^T Q [X(t+h) - X^d(t+h)] \quad (7)$$

其中: $E(t+h) = X(t+h) - X^d(t+h)$ 为 $t+h$ 时刻预测状态误差; $Q \in R^{n \times n}$ 为加权矩阵。

滚动优化的目的是为了找到当前控制 $u(t)$ 以改善 $t+h$ 时刻跟踪精度,惩罚 $t+h$ 时刻的跟踪误差 $\min_{u(t)} J(u(t))$ 。令 $\partial J / \partial u = 0$,求得控制量为

$$u(t) = -\{[\Lambda(h)N(X)]^T Q [\Lambda(h)N(X)]\}^{-1} \times [\Lambda(h)N(X)]^T Q [X(t) + Z(X,h) - X^d(t+h)] \quad (8)$$

2 基于非线性预测控制的励磁与快速汽门协调控制

2.1 发电机励磁与快速汽门系统协调控制模型

发电机组动态过程可由相互独立的励磁系统和快速汽门系统控制,各控制器的性能指标和状态变量的选取相互关联,是耦合的多变量控制系统,如图 1 所示。为保证整个系统控制目标的最优,两个控制器间必须进行协调控制^[9]。

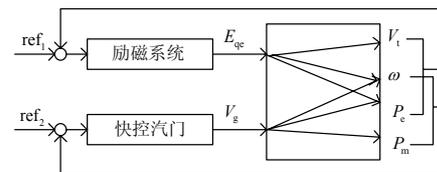


图 1 发电机组励磁和快控汽门系统略图

Fig.1 Fast valve control and excitation system

非线性预测控制中所选定的输出量或状态量及其预测阶的微分都会在预测模型中得到体现,从而使其动态性能在二次型性能指标中受到约束,进而调整整个闭环系统的综合性能指标。当系统发生故障时,为提高系统的暂态稳定性能同时较好地维持机端电压为给定值,选取功角 δ 和机端电压 V_i 为输出量建立预测模型,根据在线滚动优化求出多目标系统预测输出量的最优反馈增益,从而得出具有预测信息的励磁与快速汽门的控制量 V_g 和 E_{qc} 。

以快速汽门和励磁系统为受控对象,将发电机

高压缸和高压调节汽门油动机用一个惯性环节近似后实用发电机状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{T_j} P_h + \frac{\omega_0}{T_j} C_{ml} P_{m0} - \frac{\omega_0}{T_j} P_e - \frac{D}{T_j} (\omega - \omega_0) \\ \dot{P}_h = -\frac{1}{T_{H\Sigma}} P_h + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} P_{m0} + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} V_g \\ \dot{E}'_q = -\frac{E'_q}{T_{d0}} + \frac{E_{qc}}{T_{d0}} \end{cases} \quad (9)$$

其中: $P_e = \frac{E'_q V_s}{X'_{d\Sigma}} \sin(\delta) + \frac{V_s^2}{2} \frac{X'_d - X'_q}{X'_{d\Sigma} X'_{q\Sigma}} \sin(2\delta)$

$$E_q = E'_q \frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} - \frac{(X_d - X'_d)}{X'_{d\Sigma}} V_s \cos(\delta)$$

式中: δ 为发电机转子运行角度; ω 为发电机转速; p_h 为高压缸输出机械功率; p_e 为发电机有功功率; V_g 为高压缸汽门开度控制量。 D 、 T_j 、 $T_{H\Sigma}$ 、 C_H 为发电机的相关常数, 分别为阻尼系数、转动惯量和励磁绕组时间常数、高压缸和高压调节汽门油动机时间常数。

2.2 基于输出量 δ 、 V_t 为预测模型的励磁与快速汽门协调控制

基于输出量 δ 、 V_t 为预测模型的励磁与快速汽门协调控制规律如下:

(1) 选定发电机功角 δ 为输出量, V_g 和 E_{qc} 为控制量。输出方程 $y_1 = \delta$ 预测阶为 3 阶。设预测步长为 h , 预测模型可表示为

$$y_1(t+h) = y_1(t) + h y_1^{(1)} + \frac{h^2}{2} y_1^{(2)} + \frac{h^3}{6} y_1^{(3)} \quad (10)$$

其中: $y_1^{(1)}$ 、 $y_1^{(2)}$ 、 $y_1^{(3)}$ 分别为输出方程 δ 的一、二、三阶 Taylor 级数导数。

(2) 选定机端电压 V_t 为输出量, E_{qc} 为控制量。输出方程 $y_2 = V_t$ 的预测阶为 1 阶。假定预测步长为 h , 预测模型可表示如下

$$y_2(t+h) = y_2(t) + h y_2^{(1)} \quad (11)$$

其中, $y_2^{(1)}$ 为输出方程 V_t 的一阶 Taylor 级数导数。

(3) 为提高电力系统暂态稳定和电压稳定性, 将发电机功角 δ 和机端电压 V_t 组成多目标系统方程, 记为

$$Y_{t+h} = Y_t + A + BU \quad (12)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} h y_1^{(1)} + \frac{h^2}{2} y_1^{(2)} + \frac{h^3}{6} a_1 \\ h a_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{h^3}{6} b_{11}, \frac{h^3}{6} b_{12} \\ h b_{21}, h b_{22} \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} V_g \\ E_{qc} \end{bmatrix},$$

$$\begin{cases} a_1 = y_1^{(3)} - \left(\frac{\omega_0 C_H}{T_j T_{H\Sigma}} V_g - \frac{\omega_0 V_s \cos(\delta)}{T_j X'_{d\Sigma} T_{d0}} E_{eqc} \right) \\ a_2 = y_2^{(1)} - \frac{V_{tq} X_s}{V_t X'_{d\Sigma} T_{d0}} E_{eqc} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} b_{11} = \frac{\omega_0 C_H}{T_j T_{H\Sigma}}, b_{12} = -\frac{\omega_0 V_s \cos(\delta)}{T_j X'_{d\Sigma} T_{d0}} \\ b_{21} = 0, b_{22} = \frac{V_{tq} X_s}{V_t X'_{d\Sigma} T_{d0}} \end{cases} \quad (14)$$

(4) 发电机的运行方式是经预先整定计算后的运行曲线, 输出量 δ 和 V_t 在一定的运行区间内为常量, 其参考轨迹可表示为 $Y^d(t+h) = [\delta^*, V_t^*]^T$, 即有 $Y^d(t+h) = Y^d(t)$ 。如式(8)所示, 在线滚动优化预测模型与期望轨迹的性能指标, 获得多目标系统下励磁和快速汽门的协调控制规律。

$$U = \begin{bmatrix} \frac{1}{b_{11}} & -\frac{b_{12}}{b_{11} b_{22}} \\ 0 & \frac{1}{b_{22}} \end{bmatrix} [Y_t + A - Y_t^d] \quad (15)$$

该控制规律通过对多目标系统方程综合求解, 实现励磁和快速汽门控制量的相互关联、协调控制。同时该算法通过建立预测模型, 较好地解决了发电机状态方程非线性、时变的问题, 具有较好的适应性。基于非线性预测控制算法的发电机励磁与快速汽门协调控制算法具有解析解, 可较好地满足实时性的要求。

3 仿真试验

为验证采用非线性预测控制算法设计的发电机励磁与快速汽门协调控制规律的有效性, 对应用该控制规律的单机无穷大系统进行数字仿真, 同时将它与 PID 励磁和快速汽门控制规律的仿真结果进行比较。

单机无穷大电力系统的参数为 $x_d = 2.534$, $x_q = 2.534$, $x'_d = 0.318$, $t'_{d0} = 10$ s, $d_y = 3$, $h_j = 8$, $x_1 = 2.92$, $x_{tr} = 0.1$ 。

初始运行工况为发电机有功功率 $P_0 = 0.37$ pu, 发电机无功功率 $Q_0 = 0.2$ pu, 功角 $\delta_0 = 45^\circ$, 机端电压 $V_{t0} = 1.1$ pu, 下标 0 表示初始值。

采用本文提出的控制规律在线路首端发生三相接地短路最严重情况下进行仿真。在 0.5 s 时系统的一条线路首端发生三相接地短路, 0.65 s 后故障切除, 系统以单回路运行, 1.25 s 后重合成功, 系统恢复正常, 反映系统稳定特性的功角、电磁功率、机端电压和转速曲线如图 2 所示。其中, 实线为非

线性预测控制算法的发电机励磁与快速汽门协调控制的仿真曲线，点划线为 PID 励磁和快速汽门控制的仿真曲线。

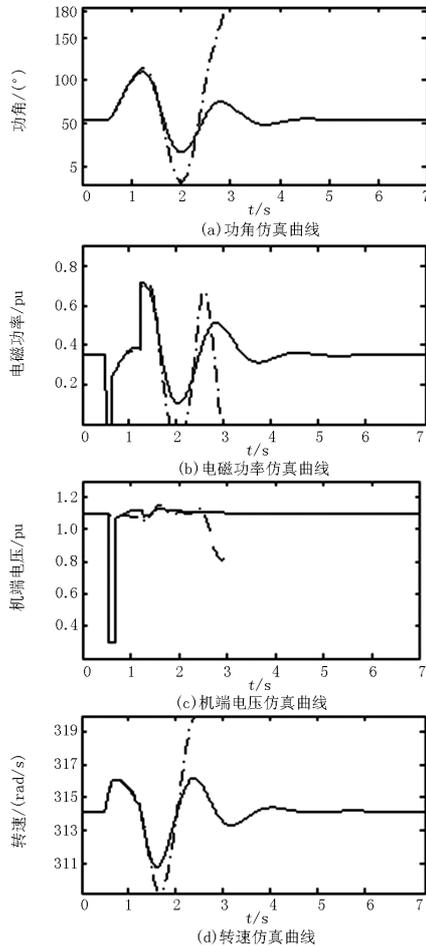


图2 线路首端发生三相接地短路仿真曲线

Fig.2 Simulation curves of system with three-phase grounding fault at the head end of a line

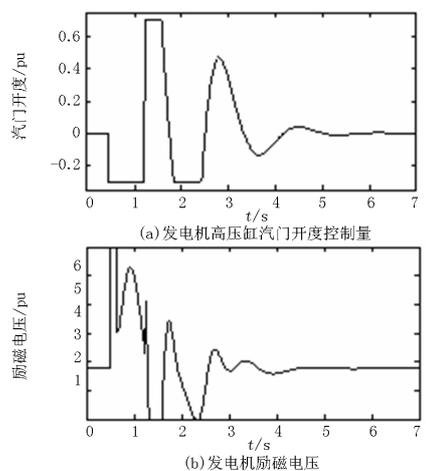


图3 线路首端发生三相接地短路控制量输出曲线

Fig.3 Controller output in response to three-phase grounding fault at the head end of a line

发电机励磁与快速汽门在故障时控制量的输出曲线如图3所示。由于控制规律通过对多目标系统方程进行综合求解，实现了励磁和快速汽门控制量的相互关联，协调了对发电机高压缸汽门开度与励磁电压的控制量的输出，避免了由于强励时间增长对系统电压造成的影响。

仿真结果表明，非线性预测控制算法的发电机励磁与快速汽门协调控制很好地增强了故障后系统的功角稳定性和电压稳定性，使两种动态品质指标无论是过渡过程时间还是震荡次数及震荡幅度都有很大改善，而在采用PID控制时，系统稳定性已遭到了破坏。

4 结论

本文研究了基于非线性预测控制算法的发电机励磁与快速汽门协调控制，并应用该控制规律对单机无穷大系统进行了数字仿真，得到了以下主要结论。

(1) 将发电机功角 δ 和机端电压 V_t 组成多目标系统方程，建立输出量 δ 、 V_t 的预测模型，提出采用非线性预测控制算法的发电机励磁与快速汽门协调控制规律。

(2) 对本文提出的控制规律进行数字仿真。仿真结果表明，此算法显著提高了系统的暂态稳定性和电压稳定性，同时增强了系统在故障后的动态品质。

但本文所得到的研究结果还是初步的，仍有许多问题需要解决。例如所选择的预测模型与预测阶段的精度对控制结果的影响、最优预测步长等问题。

参考文献

[1] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982.

[2] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

[3] 陈铁, 舒乃秋. 非线性励磁控制方法的研究[J]. 继电器, 2005, 33(19): 28-30.
CHEN Tie, SHU Nai-qiu. Research of the nonlinear excitation based on the direct feedback linearization [J]. Relay, 2005, 33(19): 28-30.

[4] 徐敏, 林辉. 基于迭代学习控制理论的励磁控制研究[J]. 继电器, 2005, 33(14): 39-42.
XU Min, LIN Hui. Research on excitation controller based on theories of iterative learning control[J]. Relay, 2005, 33(14): 39-42.

[5] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 基于输入对状态反馈线性化的非线性励磁控制[J]. 继电器, 2004, 32(5): 32-35.

(下转第 148 页 continued on page 148)

- Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science, 2002, 30(10): 50-52.
- [3] 张伟. 基于图形信息分层组织的配电网拓扑分析及其应用(硕士学位论文[D]. 成都: 四川大学, 2005.
ZHANG Wei. Analysis of distribution network's topology based on layered graphic organization mode and its application, thesis[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [4] 周步祥, 刘欣宇. 基于网络图形的配电网拓扑分析方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16):67-70.
ZHOU Bu-xiang, LIU Xin-yu. Network graph-based power distribution network topology analysis and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 67-70.
- [5] 张节潭, 黄志诚, 韦化. 基于 B/S 模式的电力系统分析软件[J]. 继电器, 2005, 33(17): 35-36.
ZHANG Jie-tan, HUANG Zhi-cheng, WEI Hua. Analysis software of electric power system based on B/S mode[J]. Relay, 2005, 33(17): 35-36.
- [6] IEC 61970 energy management system application program interface(EMS-API), part1: CCAPI guidelines preliminary draft[S].
- [7] Draft IEC61970 energy management system application program interface (EMS-API), part 301: common information model (CIM) base[S].
- [8] 杜小兵, 周步祥, 杨道驰. 基于 CIM 的配电网拓扑分析[J]. 重庆工学院学报, 2007(8): 45-49.
DU Xiao-bing, ZHOU Bu-xiang, YANG Dao-chi. CIM-based topological analysis on distribution networks[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2007, 21(15): 45-46.
- [9] 刘念, 张建华, 熊浩, 等. 面向电力仿真系统异构性的 CIM 扩展方法[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 58-59.
LIU Nian, ZHANG Jian-hua, XIONG Hao, et al. An extension method of common information model oriented to heterogeneity of electric power simulation system[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 58-59.
-
- 收稿日期: 2009-09-08; 修回日期: 2010-05-13
作者简介:
杨道驰 (1976-), 男, 讲师, 工学硕士, 主要研究方向为电力系统配网与调度自动化; E-mail: 13625521703@139.com
冯根生 (1962-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为微机控制。
-
- (上接第 58 页 continued from page 58)
- HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming. Nonlinear excitation controller based on input-state linearization[J]. Relay, 2004, 32(5): 32-35.
- [6] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 一种高性能的非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 37-42.
LI Xiao-cong, CHENG Shi-jie, WEI Hua, et al. A high performance nonlinear excitation control for generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 37-42.
- [7] 卢强, 孙元章, 沈沉, 等. 面向目标的 FACTS 设备智能预估控制方法 (一) [J]. 电网技术, 1998, 22(4): 6-9.
LU Qiang, SUN Yuan-zhang, SHEN Chen, et al. Target oriented intelligent predictive evaluating control method for FACTS devices (Part 1) [J]. Power System Technology, 1998, 22(4): 6-9.
- [8] 梁志珊, 张化光, 王红月, 等. 同步发电机励磁非线性预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 52-56.
LIANG Zhi-shan, ZHANG Hua-guang, WANG Hong-yue, et al. Nonlinear predictive control of synchronous machine excitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 52-56.
- [9] 肖智宏, 周晖, 朱启晨. 基于灰色预测控制算法的发电机最优励磁控制[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 81-85.
XIAO Zhi-hong, ZHOU Hui, ZHU Qi-chen. Optimal generator excitation controller based on grey prediction control algorithm [J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 81-85.
- [10] 崔召辉, 刘宪林, 王明东, 等. 灰色预测励磁控制同步发电机动态过程仿真[J]. 继电器, 2007, 35(6): 34-37.
CUI Zhao-hui, LIU Xian-lin, WANG Ming-dong, et al. Simulation of synchronous generator using grey prediction excitation control[J]. Relay, 2007, 35(6): 34-37.
- [11] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [12] Soroush M, Soroush H M. Input-output linearizing nonlinear model predictive control[J]. Int J Control, 1997, 65(6): 1449-1473.
- [13] Lu P, Pierson B L. Predictive controller continuous systems[J]. Int J Control, 1995, 63(3): 633-647.
-
- 收稿日期: 2009-02-09; 修回日期: 2010-03-23
作者简介:
肖智宏 (1977), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统与继电保护的分析和控制工作; E-mail: xiaozhihong@chinasperi.sgcc.com.cn
庄博 (1976), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统与继电保护的分析和控制工作;
韩柳 (1976), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统规划设计工作。